

Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen perustusten suunnittelussa

Juho Toikkanen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2020

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Toikkanen, Juho	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä toukokuu 2020
	Sivumäärä 33	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Parametrinen suunnittelun hyödyntäminen perustusten suunnittelussa		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hannu Haapamaa, Panu Putkonen		
Toimeksiantaja(t) Sweco Rakennetekniikka Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tavoitteena oli selvittää parametrinen suunnittelun soveltuvuutta käytettäväksi perustusten suunnitteluprosessissa. Lisäksi tavoitteena oli luoda laskentapohja Sweco Rakennetekniikka Oy:lle visuaalista ohjelmointia käyttäen. Parametrinen suunnittelun menetelmiä hyödynnetään jo rakenneteknisessä suunnittelussa, mutta koko potentiaalin hyödyntämiseksi vaaditaan osaamisen ja käytettävien ohjelmien kehittämistä.</p> <p>Tärkeimpiä tutkimuskysymyksiä olivat, miten hyvin luodun laskentapohjan eli algoritmin suorittaman laskennan tulokset vastasivat käsilaskennalla saatuja tuloksia ja mitä rajoitteita tai haasteita käytetyissä ohjelmistoissa ja niiden yhteistoiminnassa mahdollisesti oli.</p> <p>Tutkimuksessa kerättiin kokonaisvaltaisesti tietoa parametrisestä suunnittelusta algoritmin luomisesta sen käyttöön ja laskentatulosten analysointiin asti. Luodun laskentapohjan tuottamia perustusten mitoituksen tuloksia vertailtiin käsilaskennalla saatuihin tuloksiin.</p> <p>Parametrinen suunnittelu soveltuu käytettäväksi perustusten suunnittelussa. Luodun laskentapohjan tulokset olivat vertailukelpoisia käsilaskennan tuloksiin, vaikka laskentapohjan mitoituslaskelmat sisälsivätkin yksinkertaistuksia. Excel-ohjelmilla luotujen laskentapohjien hyödyntäminen algoritmin rakenne- ja geoteknisessä mitoituksessa ei ollut tehokasta käytössä olleilla ohjelmilla ja lisäosilla.</p> <p>Parametrinen suunnittelun käyttö rakenneteknisessä suunnittelussa sisältää paljon potentiaalia. Keskeisimpiä haasteita parametrinen suunnittelun hyödyntämiselle on ohjelmoinnin osaamisen ja tietotaidon puute.</p>		
<p>Avainsanat (asiasanat)</p> <p>parametrinen suunnittelu, algoritmi, parametri, tietomalli, Tekla, Grasshopper, Rhinoceros, mitoitus, perustuskuormat, perustukset</p>		
Muut tiedot		

Author(s) Toikkanen, Juho	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2020
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 33	Permission for web publication: x
Title of publication Utilization of parametric design in foundation design process		
Degree programme Construction and Civil Engineering		
Supervisor(s) Haapamaa Hannu, Putkonen Panu		
Assigned by Sweco Rakennetekniikka Oy		
<p>Abstract</p> <p>The goal was to determine the suitability of parametric design in the foundation design process and to get acquainted with the possibilities of parametric design. Design methods of parametric design are already utilized in structural engineering. In order to utilize the full potential of parametric design the development of skills and the programs used are required. The aim of the study was also to create a calculation layout for Sweco Rakennetekniikka Oy by using visual programming.</p> <p>The most important research questions were how well the results of the calculation layout corresponded to the results produced by manual calculation and what limitations or challenges there might have been in the software used.</p> <p>Information was comprehensively collected from the creation of the algorithm to the analysis of the calculation results. The results of foundation dimensioning produced by the calculation layout were compared to the results produced by manual calculation.</p> <p>The design method of parametric design is suitable for the foundation design process. The results of the created calculation layout were comparable to the results of the manual calculation, although the dimensioning calculations of the algorithm included simplifications. The utilization of the existing calculation layouts created with Excel program was not effective with the programs and add-ons used.</p> <p>The use of parametric design in structural design has a lot of potential. The main challenges are the lack of programming skills and know-how.</p>		
Keywords/tags (subjects) parametric design, algorithm, parameter, building information model, Tekla, Grasshopper, Rhinoceros, dimensioning, foundation loads, foundations		
Miscellaneous		

Sisältö

Käsitteet	3
1 Johdanto	5
1.1 Työn tavoitteet.....	5
1.2 Sweco Rakennetekniikka Oy.....	5
1.3 Tutkimusmenetelmät.....	6
1.4 Työn rajaus.....	6
2 Parametrinen suunnittelu	7
2.1 Visuaalinen ohjelmointi.....	8
2.2 Parametrinen suunnittelumenetelmä.....	8
2.3 Opinnäytetyössä käytetyt ohjelmat	10
3 Perustusten suunnittelu	12
3.1 Suunnittelun lähtökohdat	12
3.2 Rajatilat	13
3.3 Anturan geotekninen mitoitus	14
3.4 Anturan rakennetekninen mitoitus	15
4 Esimerkkikohde.....	22
5 Vertailulaskelmien toteutus	22
6 Tulokset	24
7 Pohdinta	28
Lähteet	30
Liitteet	32
Liite 1. Rakenneosien dimensiot	32
Liite 2. Rakenneosien poikittaisraudoitus ja pitkittäisraudoitus.	33

Kuviot

Kuvio 1. Parametrissa suunnittelua Grasshopperilla.....	7
Kuvio 2. Perinteisen ja parametrisen suunnitteluprosessin ero.....	9
Kuvio 3. Ohjelmistokokonaisuuden yhteistoiminta	11
Kuvio 4. Rakenteen geoteknisen luokan valinta	13
Kuvio 5. Raudoittamattoman anturan mitat.....	16
Kuvio 6. Pilarianturan lävistysmurtokartio.....	19
Kuvio 7. Vinohalkeamien mukainen vetovoimamalli	21
Kuvio 8. Anturoiden numerointi	24
Kuvio 9. Käsillä mitoitettut ja mallinnetut anturat, sekä algoritmin mitoitettavat ja mallintamat anturat.....	26
Kuvio 10. Algoritmin mitoitettavat ja mallintamat anturat tietomallissa.....	27

Käsitteet

Algoritmi

Algoritmi on prosessi, jossa tietoa käsitellään ennalta määrättyjen tehtävien ja tehtäväjärjestyksen mukaisesti. Tietokoneavusteisesti toteutettu algoritminen prosessi voidaan suorittaa toistuvasti määriteltyjen ehtojen mukaisesti. Algoritmin lopputulos on sama jokaisella suorituskerralla, mikäli lähtöarvoja ei muuteta. Algoritminen prosessi päättyy, kun päämäärän saavuttamiseksi annetut tehtävät on suoritettu. Suunnitteluprosessia, jonka jossakin osa-alueessa hyödynnetään algoritmeja, kutsutaan algoritmiavusteiseksi suunnitteluksi. (Tanska & Österlund 2014, 11,20.)

Parametri

Parametri on lähtötieto, joka ohjaa tiettyä algoritmisen prosessin osaa. Parametri on lukuarvo, muuttuja tai määre ja se voi olla käyttäjän määrittelemä tai esimerkiksi erillisen algoritmin tulos. Rakenteita mitoittavassa algoritmista parametrit voivat olla esimerkiksi rakennuksen mitat, neliökuormat tai maapohjan kantavuuden mitoitusarvo. (Mts. 13.)

Parametrinen mallintaminen

Parametrinen mallintaminen tarkoittaa mallinnustapaa, jossa parametrein ohjattava algoritmi ja geometriaa määrittävä suunnittelu on sovitettu yhteen, niin että parametrit ohjaavat geometrian määrittämistä ja mallinnusta. Parametrissa mallinnusta hyödyntämällä voidaan luoda kolmiulotteinen algoritmiin perustuva rakennemalli, jonka geometriaa voidaan muokata reaaliaikaisesti parametreja muuttamalla. (Mts. 13.)

Maaparametrit

Maaparametrit ovat arvoja, joiden avulla voidaan laskea geotekninen kantokestävyys pohjamaalle. Maaparametreihin kuuluu esimerkiksi maan tilavuuspainot, leikkauskestävyyskulma, pohjavesipinta, moduuliluku ja jännitysekspONENTTI.

Geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo

Geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo on tietty pohjapaine, jonka vallitessa maapohjalla on riittävä varmuus murtumaa vastaan. Geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvossa ei ole otettu huomioon mahdollisia painumia. Geoteknisen kantokestävyyden $\left(\frac{R_d}{A'}\right)$ yksikkö on $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$.

Geotekninen kantavuus

Geotekninen kantavuus on tietty pohjapaine, jonka vallitessa maapohjalla on riittävä varmuus murtumia sekä rakenteen painumia vastaan. Geoteknisen kantavuuden yksikkö on $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$.

1 Johdanto

1.1 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää parametrinen suunnittelun soveltuvuutta ja mahdollisuuksia perustusten suunnitteluprosessissa käytettäväksi. Lisätavoitteena oli luoda laskentapohja Sweco Rakennetekniikka Oy:lle visuaalista ohjelmointia käyttäen.

Tärkeimpiä tutkimuskysymyksiä olivat, miten hyvin luodun laskentapohjan eli algoritmin laskennan tulokset vastasivat käsilaskennalla saatuja tuloksia ja mitä rajoitteita tai haasteita käytetyissä ohjelmistoissa ja niiden yhteistoiminnassa mahdollisesti oli.

1.2 Sweco Rakennetekniikka Oy

Työn toimeksiantaja on Sweco Rakennetekniikka Oy. Yritys on ruotsalaisen Sweco AB:n tytäryhtiö. Konserni työllistää kokonaisuudessaan noin 17 000 työntekijää, joista noin 2 500 työskentelee Suomessa Sweco Finland Oy:n alaisuudessa. Sweco Finland Oy tarjoaa rakennetun ympäristön ja teollisuuden asiantuntijapalveluita, jotka kattavat rakennetekniikan, projektinjohdon ja rakennuttamisen, talotekniikan, arkkitehtuurin, ympäristö- ja yhdyskuntatekniikan, teollisuuden, asiantuntijapalvelut ja kansainväliset toiminnot. (Sweco n.d.)

Sweco Rakennetekniikka Oy on rakennesuunnittelun alalla selkeä markkinajohtaja, jonka palvelut kattavat kaikki rakennesuunnittelun osa-alueet, kohdetyypit ja materiaalit (Rakennetekniikka n.d). Sweco Rakennetekniikka Oy:llä on toimistot 16:lla paikkakunnalla ja yritys työllistää noin 800 asiantuntijaa. Jyväskylän toimipiste tarjoaa suunnittelu- ja konsultointipalveluja uudis- ja korjausrakennuskohteisiin.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyössä käytettiin kvalitatiivista tutkimusmenetelmää sekä algoritmin ja käsilaskennan tuloksia vertailtiin kvantitatiivista menetelmää hyödyntäen.

Tutkimuksessa kerättiin kokonaisvaltaisesti tietoa parametrisesta suunnittelusta aina algoritmin luomisesta sen käyttöön ja laskentatulosten analysointiin asti.

Kvalitatiivisen tutkimuksen tunnuspiirteitä ovat tiedon kerääminen luonnollisista ja todellisista tilanteista, kohdejoukon valinnan tarkoituksenmukaisuus sekä pyrkimys löytää odottamattomia tapauksia tai ilmiöitä. Lisäksi kvalitatiivisessa tutkimuksessa tutkija toimii usein itse tiedonkerääjänä, jolloin tutkimus voi perustua enemmän havaintoihin kuin mittaustuloksiin. Kvalitatiivisen tutkimuksen tapauksia ja aineistoa tulkitaan kuin ne olisivat ainutlaatuisia. (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2010. 164.)

1.4 Työn rajaus

Opinnäytetyössä käsitellään maanvaraisia seinä- ja pilarianturoita sekä niiden geometrian ja raudoitusten mitoitusparametrisen suunnittelun avulla.

Geoteknisessä mitoituksessa käsitellään mitoitus tilanteita, joissa lähtötietoina on pohjatutkimusraportissa ilmoitettu geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo tai geotekninen kantavuus. Opinnäytetyössä ei käsitellä geoteknisen kantokestävyyden tai geoteknisen kantavuuden määrittämistä maaparametrien pohjalta.

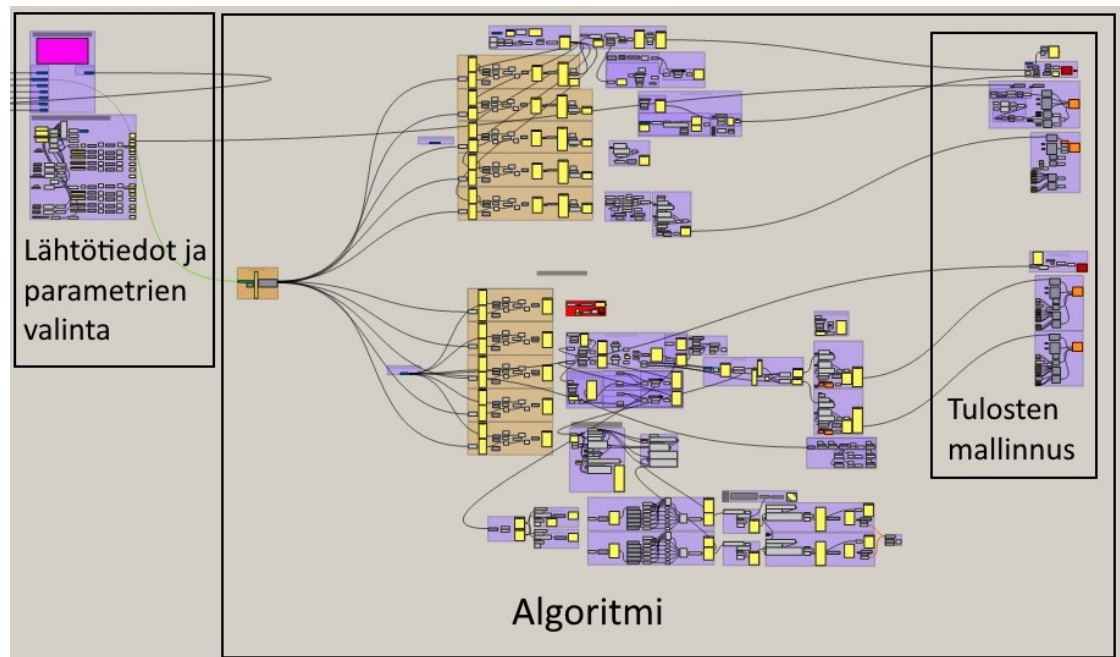
Opinnäytetyössä rajatilojen tarkastelut tehdään laskelmiin perustuvalla mitoitusmenetelmällä. Käyttörajatilojen tarkastelu on rajattu pois työstä.

Murtorajatiloista ei tarkastella rakenteen tasapainon menetystä nosteen tai muun pystykuorman vaikutuksesta (UPL) ja maapohjan nousun ja sisäinen eroosion hydraulisten gradienttien vaikutuksesta (HYD). Työssä käsitellään ainoastaan geotekniseen luokkaan 2 kuuluvia rakenteita.

2 Parametrinen suunnittelu

Parametrisessa suunnittelussa rakenteiden mitoituksessa hyödynnetään algoritmeja ja parametreja. Rakenteiden mitoittamista varten luodaan algoritmi eli laskentapohja, joka toimii automaattisesti syötettyjen lähtötietojen ja parametrien pohjalta ja tuottaa tulokseksi esimerkiksi tiedon rakenneosan geometriasta. Tietokoneavusteisesti toteutettu algoritmi suorittaa lähtöparametreille ennalta määritellyt tehtävät, joten tämän avulla voidaan vähentää suunnittelijan manuaalisesti tekemää tiedonsiirtoa ja mallintamista sekä näin ollen vähentää suunnittelun riskejä. (Vähänen 2019, 29.)

Kuviossa 1 esitetään opinnäytetyössä luotu parametrin suunnittelun laskentapohja pääosiltaan. Kokonaisuudet on ryhmitelty myöhemmin työssä käsiteltävän parametrin suunnittelumenetelmän mukaisesti. Lähtötietojen syöttäminen ja parametrien valinta suoritetaan ensin. Algoritmi suorittaa etukäteen määritetyt tehtävät, kuten rakenteiden mitoituksen ja lopputuloksen mallinnuksen, kun tarvittavat lähtötiedot on syötetty.



Kuvio 1. Parametrinen suunnittelu Grasshopperilla.

2.1 Visuaalinen ohjelmointi

Rakennesuunnittelua varten luoduissa algoritmeissa ohjelmointi toteutetaan usein hyödyntämällä visuaalista ohjelmointia. Visuaalinen ohjelmointi eroaa perinteisestä tekstimuotoisesta ohjelmoinnista siten, että ohjelmointi koostuu visuaalisista ohjelmakomponenteista, joiden välille tehdään linkkejä piirtämällä viiva komponentista toiseen. Tieto kulkee linkkiä pitkin komponentille, joka suorittaa ennalta määritetyn funktion saapuvalle tiedolle ja lähettää tiedon edelleen seuraavalle komponentille. (Tanska & Österlund 2014, 25.) Yhdessä komponentit muodostavat algoritmin.

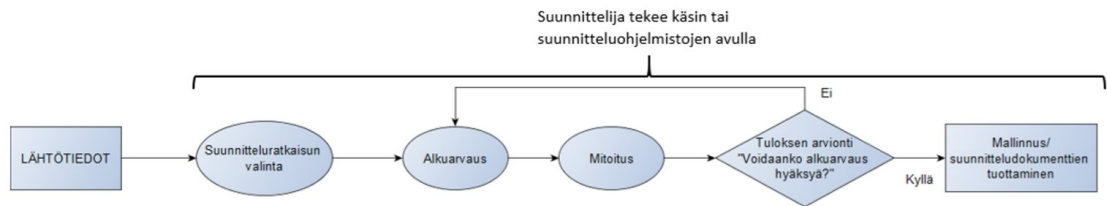
Tekstimuotoisessa ohjelmoinnissa lopputulokset päivittyvät vasta, kun ohjelmointikoodi ajetaan uudelleen läpi. Visuaalisessa ohjelmoinnissa lopputulokset päivittyvät reaaliaikaisesti, mikä mahdollistaa vaihtoehtojen vertailun ja mahdollisten virheiden löytämisen nopeasti. (Mts. 25.) Visuaalisen ohjelmoinnin selkeys ja havainnollisuus madaltavat kynnyistä ohjelmoinnin harjoittelun aloittamiselle verrattuna perinteiseen tekstimuotoiseen ohjelmointiin.

2.2 Parametrinen suunnittelumenetelmä

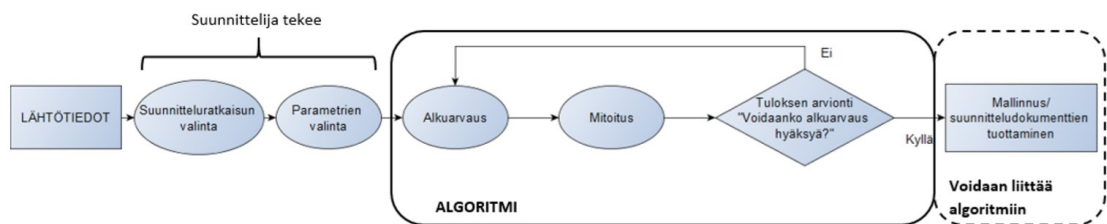
Prosessista, jossa rakenteita mitoitetaan parametrien ja algoritmien avulla, soveltuu käytettäväksi käsite parametrinen suunnittelu. Parametrinen suunnittelu on osa algoritmiaivusteista suunnittelua ja siinä korostuu suunnittelun ja mallinnuksen muutosmahdollisuus parametrien avulla. Algoritmiaivusteisessa suunnittelussa painottuu sen sijaan suunnittelun ja mallintamisen toteuttaminen algoritmien avulla. (Vähänen 2019, 29.)

Kuviossa 2 havainnollistetaan perinteisen suunnitteluprosessin ja parametrisen suunnitteluprosessin eroja kaaviomuodossa. Suunnitteluprosessi käynnistyy lähtötietojen pohjalta. Lähtötiedot saadaan suunnittelutehtävän mukaan tilaajalta, arkkitehdilta tai muun suunnittelualan edustajalta kuten esimerkiksi geotekniseltä suunnittelijalta. (Lalla 2017, 31.)

Perinteinen suunnittelumenetelmä



Parametrinen suunnittelumenetelmä



Kuvio 2. Perinteisen ja parametrinen suunnitteluprosessin ero (Lalla 2017, 31).

Lähtötietovaiheen jälkeen siirrytään suunnitteluratkaisun valintaan, jossa valitaan kantavien rakenteiden rakenneratkaisu eli kuinka rakenteelle tulevat kuormat siirretään seuraaville rakenteille ja sitä kautta perustuksille, josta edelleen maapohjaan. Suunnitteluratkaisun valintaan asti prosessit ovat pääsääntöisesti yhtenevät. (Mts. 31.)

Suunnitteluratkaisun valinnan jälkeen parametrinen suunnittelumenetelmää hyödyntävässä prosessissa suunnittelija valitsee parametrit, jotka ohjaavat algoritmin toimintaa. Parametrien valinta on monipuolinen tehtävä, jossa on otettava huomioon tavoiteltava lopputulos ja siihen vaikuttavat tekijät. Suunnittelija tekee parametreja valitessaan vastaavia päätelmiä kuin alkuarvausta muodostaessaan. Valittavien parametrien määrä riippuu käytettävästä algoritmista. Rakenneteknistä mitoitus suorittavissa algoritmeissa käytettävien parametrien määrä on pääsääntöisesti vähäisin teräsrakenteissa. Materiaalina teräs on homogeenista, joten poikkileikkauksen kapasiteettiin vaikuttavia parametreja on yksinkertaisissa mitoitus tilanteissa vain lujuusluokka. Teräsbetonirakenteita mitoittavassa

algoritmissa tarvitaan huomattavasti enemmän parametreja, sillä betonipoikkileikkauksen kapasiteettiin vaikuttaa betonin lujuusluokan lisäksi myös raudoitukset. (Mts. 31,48.)

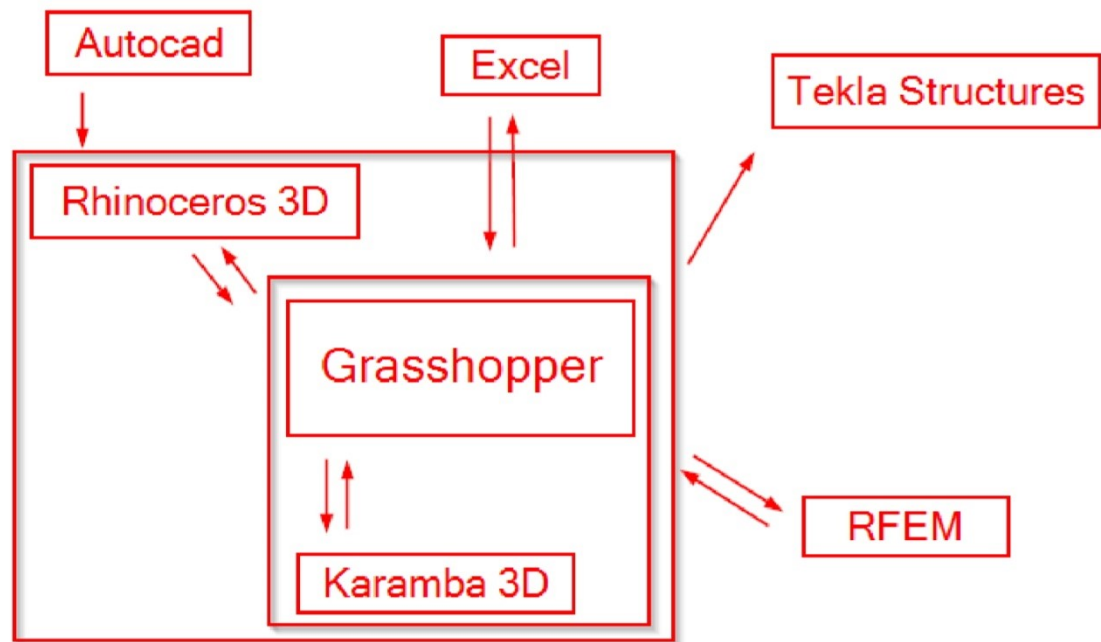
Parametrien valinnan jälkeen tehdään alkuarvaus. Perinteisessä suunnittelumenetelmässä suunnittelija tekee alkuarvauksen, kun taas parametrisessa suunnittelumenetelmässä algoritmi tekee alkuarvauksen. Kokenut suunnittelija voi arvioida rakenteen suuruusluokan lähelle todellista lopputilannetta, jolloin alkuarvausta ja mitoitusta ei tarvitse iteroida useita kertoja. Parametrisessa suunnitteluprosessissa algoritmin alkuarvauksen ei välttämättä tarvitse olla yhtä lähellä tavoiteltuun lopputulokseen johtavaa alkuarvausta. Tästä huolimatta parametrinen suunnitteluprosessi on tehokas sillä algoritmi iteroi prosessia automaattisesti niin kauan, kunnes alkuarvaus täyttää kaikki sille asetetut kriteerit ja lopputulos voidaan hyväksyä. (Mts. 31.)

Algoritmiin voidaan sisällyttää myös rakenteiden mallinnus ja suunnitelmadokumenttien tuottaminen. Perinteisessä suunnitteluprosessissa sopivan alkuarvauksen hyväksymisen jälkeen suunnittelija mallintaa tai piirtää rakenteen geometrian suunnitteludokumenttien luomista varten. Mikäli geometrian mallinnus sisällytetään algoritmiin, saadaan reaaliajassa muuttuva geometriamalli, jonka avulla voidaan havainnoida ja vertailla tuloksia parametreja muuttamalla. Lisäksi parametrinen suunnittelu mahdollistaa eri suunnitteluratkaisujen lopputulosten tehokkaamman vertailun. (Mts. 31-32.)

2.3 Opinnäytetyössä käytetyt ohjelmat

Tässä opinnäytetyössä luotiin parametrista suunnittelua hyödyntäen laskentapohja maanvaraisten seinä- ja pilarianturoiden mitoittamiseksi. Käytettyyn ohjelmakokonaisuuteen kuului Rhinoceros 3D sekä ohjelman lisäosa Grasshopper. Lisäksi työssä hyödynnettiin AutoCAD-, Excel- ja Tekla Structures -ohjelmia.

Työssä käytetyt ohjelmat toimivat yhdessä kuvion 3 mukaisesti. Yhteistoiminta pohjautuu Grasshopperissa visuaalisella ohjelmoinnilla luotuun algoritmiin. RFEM ja Karamba 3D ovat FEM-laskentaohjelmia. Tässä työssä niiden käyttö kuitenkin rajattiin pois, sillä FEM-laskennan käyttäminen nähtiin perustusten mitoituksen kannalta hyödyttömänä.



Kuvio 3. Ohjelmistokokonaisuuden yhteistoiminta (Vähänen 2019, 36).

Algoritmile annetaan rakenteiden geometrian lähtötiedot AutoCAD-ohjelmalla luotavalla dwg-tiedostomuotoisella piirustuksella, jossa on viivalla piirrettyinä seinälinjat ja pisteillä merkittynä pilareiden paikat. Ohjelmakokonaisuudessa on mahdollista käyttää mukana RFEM-ohjelmaa, siten että se toimittaisi lähtötietoja mitoitukseen.

Rakenteiden mitoittamiseksi tehtävät laskelmat voidaan toteuttaa Grasshopperin sisällä erilaisia komponentteja käyttämällä tai hyödyntämällä esimerkiksi Excel-laskentapohjia. Excel-ohjelmalla luotuja laskentapohjia voidaan hyödyntää parametrise suunnittelun algoritmissa niin, että Grasshopperin Excel-komponentti syöttää tietoa taulukkoon, joka suorittaa laskennan ja tämän jälkeen komponentti

lukee tiedon Excel-taulukosta. Excel-taulukoita voidaan käyttää myös esimerkiksi lähtötietojen syöttämiseen tai niihin voidaan tulostaa tietoa laskelmista.

Parametrisessa mallintamisessa voidaan käyttää osana Tekla Structures tietomalliohjelmaa. Algoritmile syötetyt parametrit ohjaavat rakenteiden laskentaa ja lopputuloksen mallinnusta tietomalliin. Grasshopperissa toimivilla Tekla-komponenteilla voidaan tietomalliin luoda rakenteita sekä muokata niitä. Rakenteiden luonti ja muokkaaminen tapahtuu reaaliaikaisesti. (Grasshopper-Tekla Live Link 2020.)

3 Perustusten suunnittelu

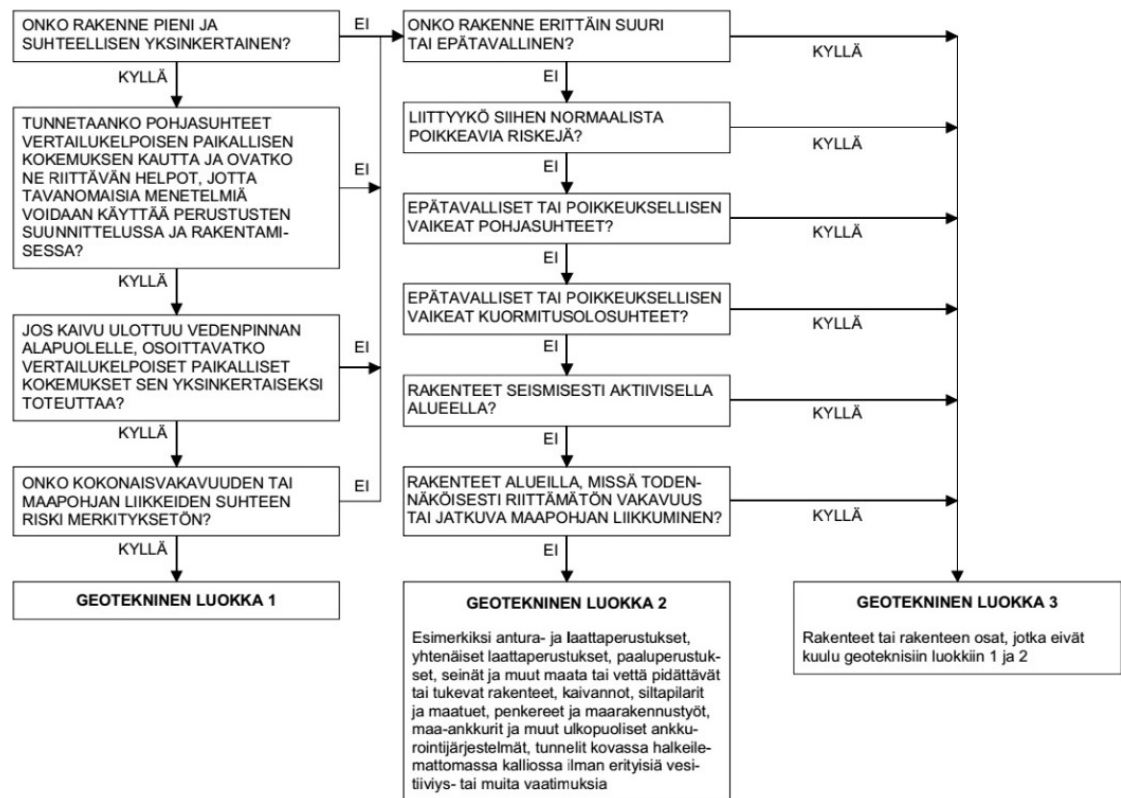
3.1 Suunnittelun lähtökohdat

Perustusten geoteknisen ja rakenneteknisen suunnittelun pohjana toimii pohjatutkimusraportti. Raportista tulee selvittää tarvittavat lähtötiedot maata vasten olevien rakenteiden mitoittamista varten sekä kaikki käytettävissä olevat geotekniset tiedot ja niiden arviointi. Raportissa esitetään normaalisti mittaustiedot ja niiden hankkimisessa käytetyt mittausmenetelmät sekä esimerkiksi tiedot rakennuspaikan geologiasta, pohjavedestä, radonin esiintymisestä, maalajien routivuudesta sekä maalajikerrosten geotekniset tiedot. (SFS-EN 1997-1:2014, 46-48.)

Pohjatutkimusraportista saatavat lähtötiedot maan kantokestävyyttä koskien ovat joko geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo, geotekninen kantavuus tai maaparametrit, joiden avulla voidaan laskea geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo. Opinnäytetyössä ei käsitellä geoteknisen kantokestävyyden laskentaa maaparametrien pohjalta eikä mitoituslannetta, jossa lähtötietoina on maaparametrit. Erilaisten lähtötietojen käyttö voi lisätä riskiä väärinymmärryksille ja aiheuttaa epäselvyyksiä vastuun jakautumisesta.

Geotekniset suunnitteluvaatimukset voidaan määritellä kolmen geoteknisen luokan mukaan. Rakenteelle määritetään geotekninen luokka kuvion 4 mukaisesti.

Geotekniseen luokkaan 1 kuuluvia rakenteita voidaan mitoittaa kokemusperäisten menetelmien avulla, kun riskit kokonaisvakavuuden ja maapohjan liikkeiden suhteen on vähäiset tai pohjaolosuhteet ovat yksinkertaiset ja niistä on vertailukelpoista kokemusta vastaavista kohteista. Luokassa 2 tulee rakenteiden mitoittamiseen käyttää kvantitatiivisia geoteknisiä lähtötietoja ja analyysyjä. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2017, 32-34.) Rakennesuunnittelija voi suunnitella geoteknisiin luokkiin 1 ja 2 kuuluvia rakenteita. Geoteknisessä luokassa 3 suunnittelijaksi vaaditaan yleisesti geoteknistä suunnittelijaa (Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan osa 6: perustukset 2011, 2).



Kuvio 4. Rakenteen geoteknisen luokan valinta (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2017, 34).

3.2 Rajatilat

Mitoitustilanteen rajatila voi esiintyä joko maapohjassa, rakenteessa tai yhdistettynä rakenteen ja maapohjan murtumana. Rakenteen mitoituksen rajatilat voidaan

tarkastaa laskelmiin perustuvalla mitoituksella, ohjeellisten sääntöjen mukaisella suunnittelulla, kokeellisilla malleilla, kuormituskokeilla ja seurantamenetelmillä tai edellä mainittujen menetelmien yhdistelmällä (SFS-EN 1997-1:2014, 20).

Rakenteen mitoituksessa tulee tarkastaa murtorajatilat sekä käyttörajatilat. Murtorajatilassa rakenteeseen tai maapohjaan syntyy murtuma tai tasapainotilan menettäminen. Käyttörajatilassa rakenteeseen syntyvät muodonmuutokset kuten halkeilu, taipuma tai värähtely heikentävät rakenteen säilyvyyttä, ulkonäköä tai käyttömukavuutta. (Mts. 29-30, 63-65.)

Perustusten mitoituksessa tulee tarkastaa seuraavat murtorajatilat: rakenteen tai maapohjan staattisen tasapainon menetys (EQU), rakenteen murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, josta seuraa kantokyvyn menetys (STR), maapohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos (GEO), rakenteen tasapainon menetys nosteen tai muun pystykuorman vaikutuksesta (UPL) sekä maapohjan nousu ja sisäinen eroosio hydraulisten gradienttien vaikutuksesta (HYD) (Mts. 29-30).

3.3 Anturan geotekninen mitoitus

Eurokoodissa esitetään kolme mitoitus tapaa murtorajatilojen tarkasteluun. Mitoitustavat eroavat toisistaan käytettävien osavarmuuslukujen perusteella. Osavarmuuslukujen sarjat kohdistuvat kuormiin, maaparametreihin ja kestävyys. Eri mitoitus tavoissa käytetään erilaisia yhdistelmiä osavarmuuslukujen sarjoista. (Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN1997-1 suunnitteluohje 2017, 51-55). Geoteknisen kantokestävyyden mitoitusarvo saadaan määritettyä mitoitus tavalla 2.

Suunnittelussa valitaan perustusten mitat niin, että maapohja kestää kuormat murtumatta ja että painumat sekä siirtymät pysyvät sallituissa rajoissa. Lisäksi rakenteet mitoitetaan niin, että ne kestävät rasitukset murtumatta ja, että halkeamat ja muodonmuutokset pysyvät sallituissa rajoissa. Perustukset on mitoitettava niin, että kaikissa murtorajatiloissa toteutuu kaavan 1 mukainen kantokestävyyden mitoitus ehto (Mts. 104). Mikäli anturan mittojen laskennassa käytetään geoteknisen

kantokestävyyden mitoitusarvoa, tulee painumat tarkastaa. Jos anturan mitat lasketaan geoteknisen kantavuuden pohjalta, on varmuus painumia vastaan riittävä. Anturaperustuksille on määritetty myös seuraavat vähimmäismitat. Seinäanturan vähimmäisleveys on 0,3 metriä ja pilarianturan sivumitat ovat vähintään 0,4 x 0,4 metriä. Perustamissyvyys anturaperustukselle on vähintään 0,5 metriä. (Mts. 103.)

$$N_d \leq R_d \quad (1)$$

missä

N_d = normaalivoiman laskenta-arvo

R_d = kantokestävyyden mitoitusarvo murtorajatilassa

3.4 Anturan rakennetekninen mitoitus

Pienet anturat voidaan toteuttaa raudoittamattomina, jolloin rakenteen toiminta perustuu siihen, että kuorma siirtyy maapohjaan puristuksena. Raudoittamattoman anturan korkeus tulee olla niin suuri, että se täyttää kaavan 2 mukaisen ehdon. Raudoittamattoman anturan mitat on esitetty kuviossa 5.

$$\frac{0,85h_f}{a} \geq \sqrt{\frac{3\sigma_{gd}}{f_{ctd,pl}}} \quad (2)$$

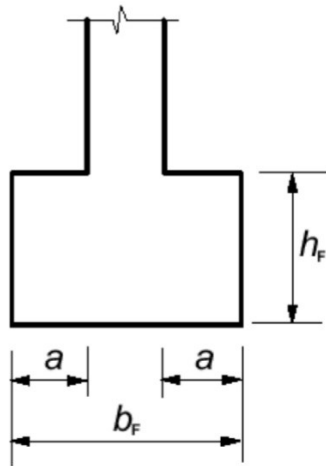
missä

h_f = anturan paksuus

a = anturan ulkonema

σ_{gd} = pohjapaineen mitoitusarvo

$f_{ctd,pl}$ = betonin vetolujuuden mitoitusarvo



Kuvio 5. Raudoittamattoman anturan mitat (SFS-EN 1992-1-1:2015, 194).

Antura suunnitellaan raudoitettuna, mikäli anturan leveys kasvaa niin suureksi, että ei ole mielekästä kasvattaa anturan paksuutta kaavan 2 mukaisesti. Mikäli antura suunnitellaan raudoitettuna, voidaan anturan paksuus arvioida kaavan 3 mukaisesti. Tällöin rakenteen toiminta perustuu siihen, että kuorma siirtyy maapohjaan anturan taivutus- ja leikkausrasitusten kautta.

$$h = \frac{b}{3...4} \quad (3)$$

Anturan taivutusmitoituksessa voidaan rakennetta tarkastella ulokeperiaatteella. Antura mitoitetaan lähtökohtaisesti kantokestävyyden mitoitusarvon mukaiselle kuormalle, jolloin anturaa voidaan rasittaa maan kantavuuden sallimissa rajoissa ilman sen murtumista. Seinäanturan momentin laskentaan vaikuttaa yläpuolisen rakenteen liitos anturaan. Jäykkänä liitoksena voidaan pitää paikallavaletun seinän tai pilarin ja peruspultein kiinnitetyn rakenteen liitosta anturaan. Elementtien tai muurattujen seinien liitoksia anturaan ei voida pitää jäykkinä. (Leskelä 2008, 447.)

$$M_{Ed} = \frac{a^2 \sigma_{gd}}{2}, \text{ kun liitosta voidaan pitää jäykkänä} \quad (4)$$

$$M_{Ed} = \frac{b_f^2 \sigma_{gd}}{8}, \text{ kun liitosta ei voida pitää jäykkänä} \quad (5)$$

missä

b_f = anturan sivumitta

Mitoitusmomentin mukainen suhteellinen momentti voidaan laskea kaavan 6 mukaisesti. Lisäksi tulee tarkistaa, että mitoitusmomentin mukainen suhteellinen momentti on pienempi kuin tasapainoraidoituksen mukainen suhteellinen momentti.

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} b d^2} \quad (6)$$

Poikkileikkauksen tehollisen puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus voidaan laskea kaavan 7 mukaisesti.

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (7)$$

Mekaaninen raudoitussuhde saadaan yhtälöstä 8.

$$\omega = \beta \quad (8)$$

Poikkileikkauksen vaadittu teräsala voidaan laskea kaavan 9 mukaisesti.

$$A_{s,vaad} = \omega b d \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (9)$$

Poikkileikkauksen vähimmäisteräsala voidaan laskea kaavan 10 mukaisesti.

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b d \\ 0,0013 b d \end{array} \right. \quad (10)$$

Poikkileikkauksen toteutuvaksi teräsalaksi valitaan kaavojen 9 ja 10 tuloksista suurempi. Jakoraudoituksen raudoitusalana voidaan käyttää määrää, joka on vähintään 20 % pääraudoituksen raudoitusalasta (SFS-EN 1992-1-1:2015, 156).

Perustukset on mitoittettava niin, että kaikissa murtorajatiloissa toteutuu leikkaus- tai lävistysjännityksen kaavan 11 mukainen mitoitusehto. Seinäanturoille tehdään leikkaustarkastelu ja pilarianturoille lävistystarkastelu. Mikäli leikkausjännitys ylittää leikkauskestävyyden mitoitusarvon, on käytettävä leikkausraudoitusta. (Mts. 99) Anturan paksuus valitaan yleisesti niin, että anturalle ei tarvitse mitoittaa leikkausraudoitusta. (Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan osa 6: perustukset 2011, 6). Anturalle suunnitellaan leikkausraudoitus, mikäli anturaa ei ole mielekästä paksuntaa niin paljon, että mitoitusehto toteutuu.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (11)$$

missä

V_{Ed} = rakenteessa vaikuttava leikkausjännitys

$V_{Rd,c}$ = leikkaus- tai lävistyskestävyyden mitoitusarvo

Leikkausraudoittamattoman anturan leikkauskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kaavan 12 mukaisesti. Rakenteessa vaikuttava leikkausjännitys voidaan laskea seinäanturalle laatan mitoituksen kaavoja hyödyntämällä kaavan 13 mukaisesti.

$$V_{Rd,c} = \max \begin{cases} V_{Rd,c0} = \frac{0,18}{\gamma_c} d k \left(100 \rho_L \frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{3}} MPa \\ V_{Rd,cmin} = 0,035 d k^{\frac{3}{2}} \left(\frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{2}} MPa \end{cases} \quad (12)$$

$$V_{Ed} = \sigma_{gd} \left(c - \frac{d}{2} \right) \quad (13)$$

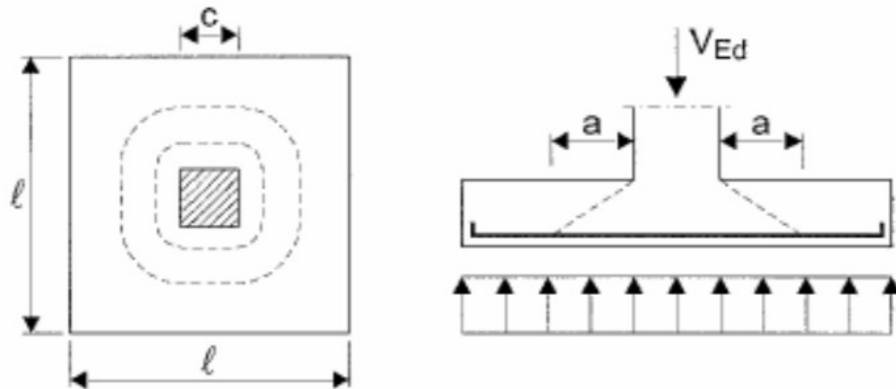
Leikkausraudoittamattoman anturan lävistyskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kaavan 14 mukaisesti.

$$v_{Rd,c} = c_{Rd,c} k (100 \rho_L f_{ck})^{\frac{1}{3}} 2 \frac{d}{a} \quad (14)$$

Pilarianturan lävistystarkastelussa leikkausjännitys lasketaan anturan alapinnan tehokkaan pinta-alan alalle vaikuttavan pohjapaineen mukaisesti. Tehokas pinta-ala määräytyy anturan lävistyskartion mukaisesti. Leikkausjännitystä tarkastellaan lävistyskartion mukaisella tarkastuspiirillä. Kuviossa 6 havainnollistetaan murtokartiota ja sen mukaista tarkastuspiiriä. Pilarianturan leikkausjännitys voidaan laskea kaavojen 15 ja 16 mukaisesti.

$$V_{Ed,Red} = \sigma_{gd} A_{eff} \quad (15)$$

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,Red}}{u d} \left(1 + k \frac{M_{Ed} u}{V_{Ed,Red} W} \right) \quad (16)$$



Kuvio 6. Pilarianturan lävistysmurtokartio (Eurocode 2 Commentary 2017, luku 6.4.5).

Teräsbetonirakenteen raudoitusten riittävä ankkurointi tulee varmistaa. Raudoitustangot ja verkot tulee ankkuroida niin, etteivät tartuntavoimat aiheuta

betoniin tankojen suuntaista halkeilua tai murtumista. Lisäksi tartuntalujuuden tulee olla niin suuri, että tartunnan pettämisestä syntyvää murtumista ei pääse tapahtumaan. (SFS-EN 1992-1-1:2015, 131-132.) Kaavan 17 mukaisesti ankkurointialueella syntyvän ankkurointivoiman tulee olla suurempi kuin ankkuroitavan voiman.

$$F_{bd} \geq F_s \quad (17)$$

Ankkurointivoima voidaan laskea kaavan 18 mukaisesti.

$$F_{bd} = l_b f_{bd} \sum u_s \quad (18)$$

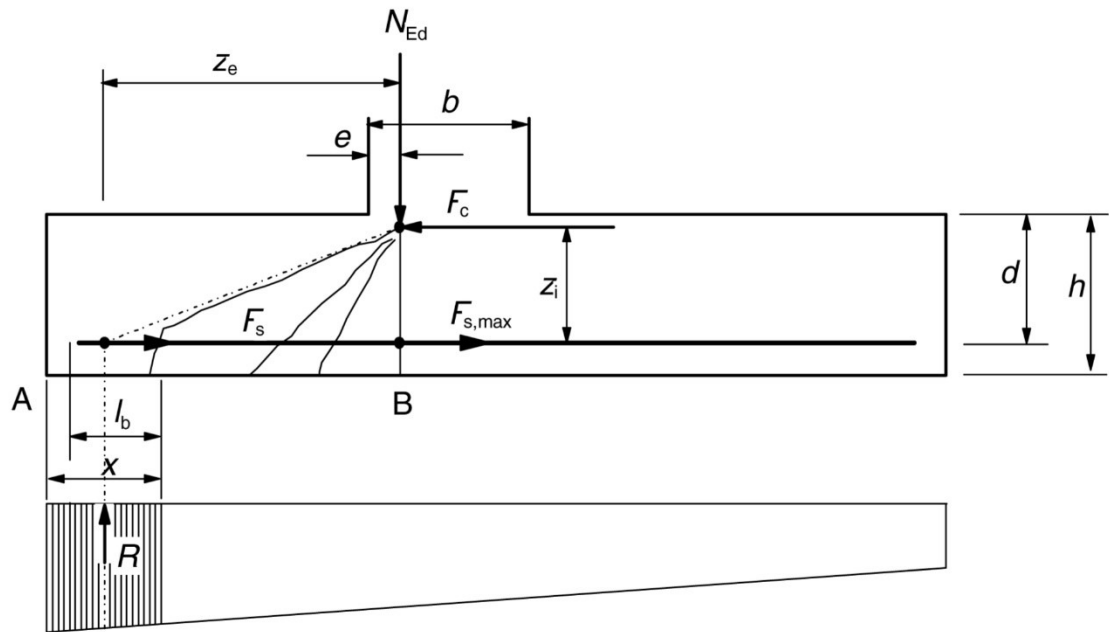
missä

l_b = ankkurointipituus

u_s = raudoitustangon ympärysmitta

f_{bd} = tartuntalujuuden mitoitusarvo

Raudoitteen ankkuroitava vetovoima on kaavan 19 mukainen. Kuviossa 7 esitetään vinohalkeamien mukainen vetovoimamalli ja havainnollistetaan kaavan 19 muuttujia.



Kuvio 7. Vinohalkeamien mukainen vetovoimamalli (SFS-EN 1992-1-1:2015, 163).

$$F_s = R \frac{z_e}{z_i} \quad (19)$$

missä

F_s = ankkuroitava vetovoima

R = pituudella x vaikuttavan pohjapaineen resultantti

z_e = resultantin R ja pystykuorman N_{ed} välinen etäisyys

z_i = raudoituksen ja raudoituksen suurinta vetovoimaa vastaavan puristusvoiman F_c välinen etäisyys

4 Esimerkkikohde

Opinnäytetyössä luotua parametrisen suunnittelun laskentapohjaa testattiin käynnissä olevassa suunnitteluhankkeessa. Laskentapohjalla mitoitettiin esimerkkikohteeseen maanvaraiset perustukset, joihin sisältyy seinä- ja pilarianturoita. Tuloksia verrattiin käsilaskennalla ja muilla käytetyillä laskentapohjilla saatuihin tuloksiin.

Esimerkkikohteena käytettiin betonielementtirunkoista maanvaraisesti perustettua asuinkerrostaloa. Rakennuksessa on kuusi maanpäällistä kerrosta sekä kellarikerros. Kaikissa kerroksissa kerroskorkeus on 3 metriä. Runkoratkaisuna rakennuksessa toimii kantavat seinät-laatta -järjestelmä, missä kantavina rakenteina käytetään teräsbetonisia väliseinä- ja sandwich-elementtejä sekä ontelolaattoja. Rakennuksen jäykistäminen poikittaissuunnassa on toteutettu kantavilla seinillä. Esimerkkikohde sijaitsee Keski-Suomessa.

Esimerkkikohteeksi valittiin kyseinen rakennus, koska kohteen suunnitteluvaihe on käynnissä ja näin ollen kohde on ajankohtainen. Rakennus soveltui hyvin käytettäväksi esimerkkikohteena kokoluokkansa puolesta. Ulkomitat ovat noin 27 metriä ja 20 metriä. Toistuvia perustusrakenteita ei ollut, joten saatiin aikaan monipuolisesti mitoitustilanteita ja algoritmin toimintaa voitiin luotettavammin analysoida. Pilarianturoita rakennuksessa on ainoastaan parveketornien pilareiden alla ja rakenteiden ollessa toistuvia, mitoitustilanteet jäivät vähäisiksi.

5 Vertailulaskelmien toteutus

Opinnäytetyössä luotu parametrisen suunnittelun algoritmi liitettiin osaksi yrityksessä jo aikaisemmin käytössä ollutta runkogeometriaa mitoittavaa algoritmia. Runkogeometriaa mitoittavalta algoritmilta saatiin lähtötiedoiksi perustuksia mitoittavalle algoritmille perustuksiin kohdistuvat pysty- ja vaakakuormat sekä momentit. Vertailulaskelmien toteutuksessa valittiin kuitenkin algoritmille ja

käsilaskennalle käytettäväksi samat lähtötiedot, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia ja ylimääräiset muuttujat jäävät pois. Perustuskuormien laskenta toteutettiin Excel-laskentapohjan avulla.

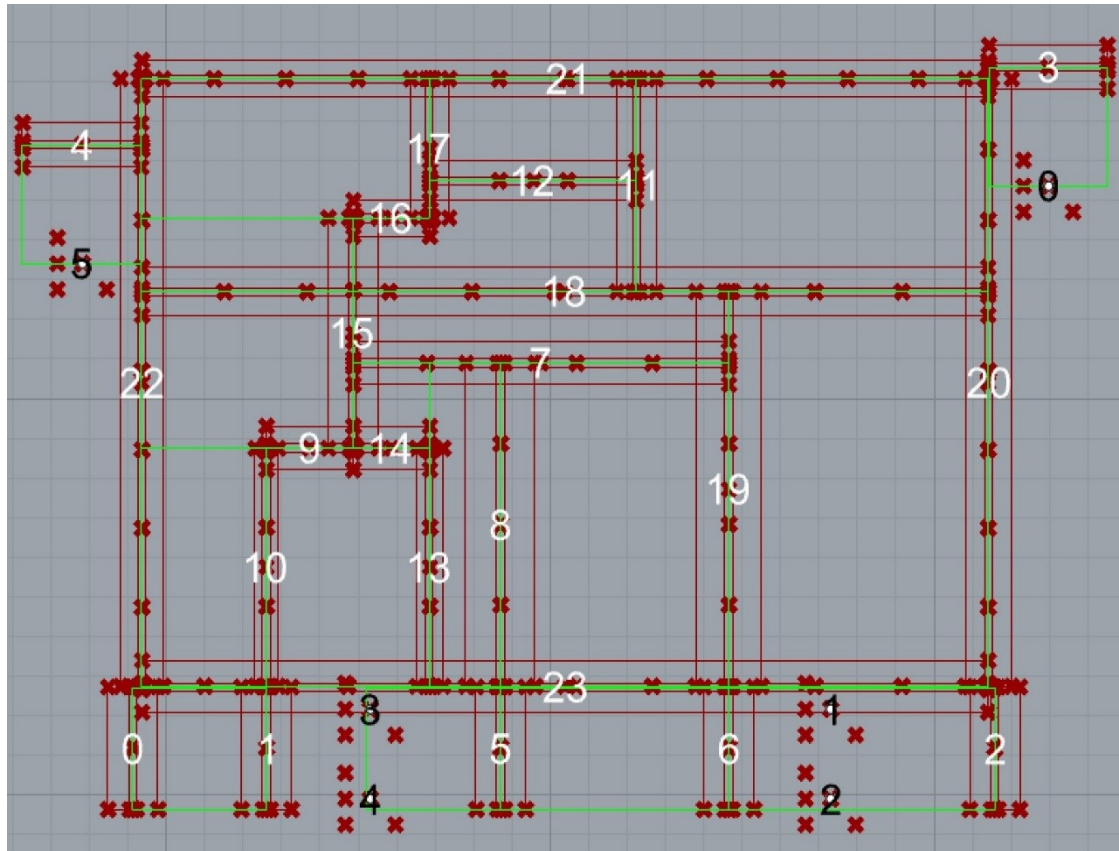
Käsilaskennassa anturoiden mitoitus toteutettiin Excel-laskentapohjan avulla. Lähtötiedoiksi valittiin 100:n vuoden käyttöikä seinäanturoille ja 50:n vuoden käyttöikä pilarianturoille, XC2 rasitusluokka, C30/37 betoni, 16mm B500B betoniteräs, 50mm betonipeite ja $450 \frac{kN}{m^2}$ geotekninen kantokestävyys.

Työmaateknisistä syistä ei ole kannattavaa optimoida jokaisen anturan geometriaa ja suunnitella kymmeniä eri kokoisia anturoita, joten tulokset tiivistettiin kolmeen anturakokoon. Käytetty Excel-laskentapohja huomioi murtorajatilamitoituksen lisäksi käyttörajatilamitoitukset.

Parametrisen suunnittelun algoritmissa tehtyjen yksinkertaistusten vuoksi syötettävien lähtötietojen eli parametrien määrä on pienempi. Parametreiksi syötettiin C30/37 betoni, 16mm B500B betoniteräs, 50mm betonipeite ja $450 \frac{kN}{m^2}$ geotekninen kantokestävyys.

Algoritmin mitoitusosiossa tehtiin yksinkertaistuksia käytettävissä olevan ajan rajallisuuden vuoksi. Anturan omaa painoa ei huomioida laskennassa, ja vaakakuorman aiheuttaman momentin laskennassa käytetään anturan korkeutta, joka saadaan arvioitua pystykuorman ja kantokestävyys mukaan. Iterointia ei suoriteta, mutta laskelmien käyttöasteet tarkastetaan ja algoritmi ilmoittaa, mikäli jokin käyttöasteista ylittyy tai kuormituksen epäkeskisyys on liian suuri. Anturan pohjan pinta-ala lasketaan kantokestävyys mukaan ja pinta-alaa kasvatetaan kuorman epäkeskisyyden mukaan, jolloin sallittu pohjapaine ei ylity.

Perustusten rakenneosat numeroitiin Grasshopperin käyttämän numerointiperusteen mukaisesti. Anturoiden numerointi esitetään kuviossa 8. Seinäanturat numeroitiin luvuilla 0-23 ja pilarianturat luvuilla 0-5. Kuviossa 8 seinäanturoiden numeroinnissa on käytetty valkoista väriä ja pilarianturoiden numeroinnissa mustaa väriä.



Kuvio 8. Anturoiden numerointi.

6 Tulokset

Laskelmien tulokset esitetään liitteissä 1 ja 2. Liitteissä esitetään luodulla laskentapohjalla sekä käsilaskennalla mitoitettut rakenneosien dimensiot ja raudoitukset.

Liitteessä 1 esitetään luodulla laskentapohjalla ja käsilaskennalla mitoitettut rakenneosien dimensiot. Luodun laskentapohjan tulokset esitetään ensimmäisessä sarakkeessa. Toisessa pystysarakkeessa esitetään tulokset, jotka saatiin laskentapohjalla, kun seinäanturoille valittiin käytettäväksi kolme kokoa 500 x 1200, 500 x 1600 ja 600 x 1800. Mikäli anturan koko on alle 500 x 1200, valitaan kooksi 500 x 1200. Mikäli anturan koko on alle 500 x 1600, valitaan kooksi 500 x 1600. Näitä isommille anturoille valitaan koko algoritmin antaman suurimman anturakoon

mukaan, joka on suurimmillaan 600 x 1 800. Kaksi pienempää anturakokoa ovat samat kuin käsilaskennassa.

Kolmannessa pystysarakkeessa esitetään käsilaskennalla mitoitetut rakenneosien dimensiot. Seinäanturoille valittiin käytettäväksi kolme kokoa 500 x 1200, 500 x 1600 ja 600 x 2100. Mikäli anturan koko on alle 500 x 1200, valitaan kooksi 500 x 1200. Mikäli anturan koko on alle 500 x 1600, valitaan kooksi 500 x 1600. Näitä isommille anturoille valitaan koko käsilaskennan antaman suurimman anturakoon mukaan, joka on suurimmillaan 600 x 2100.

Liitteessä 2 esitetään työssä luodulla laskentapohjalla ja käsilaskennalla mitoitetut rakenneosien raudoitukset. Luodun laskentapohjan tulokset esitetään ensimmäisessä sarakkeessa. Toisessa pystysarakkeessa esitetään tulokset, jotka saatiin laskentapohjalla, kun seinäanturoille valittiin käytettäväksi kolme edellä mainittua kokoa edellä mainituilla perusteilla. Kolmannessa pystysarakkeessa esitetään käsilaskennalla mitoitetut rakenneosien raudoitukset.

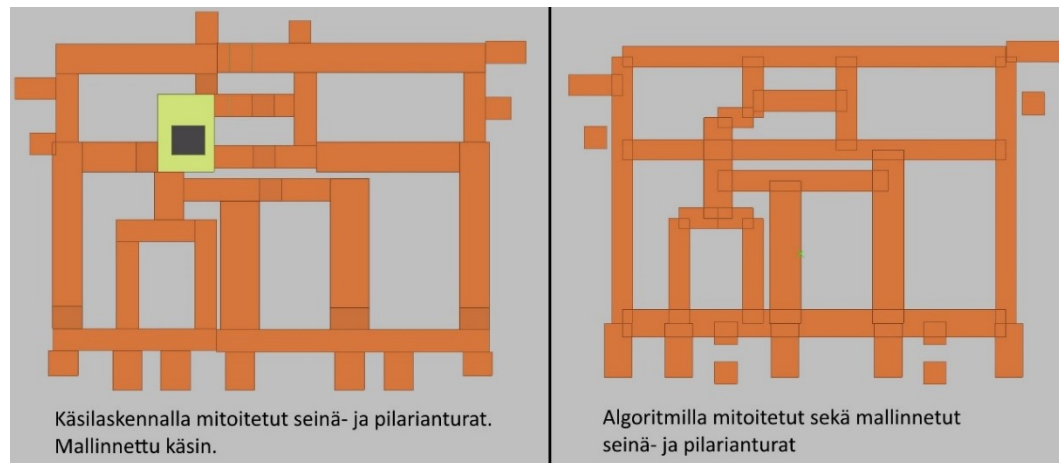
Pilarianturat 1 ja 2 sekä 3 ja 4 on yhdistetty käsilaskennassa. Algoritmissa tätä ei ole otettu huomioon, joten tulokset eivät ole vertailukelpoisia. Algoritmi määrittää anturat lähtötiedoissa annettujen seinälinjojen mukaisille paikoille. Todellisuudessa anturan 16 tilalla on hissin pohjalaatta, joten käsilaskennassa ei ole tulosta kyseiselle anturalle.

Vertailulaskennan perusteella algoritmin ja käsilaskennan tulokset ovat kolmella määritetyllä anturakoolla eri kokoiset seitsemän seinäanturan kohdalla. Kuusi algoritmin mitoittamista anturoista on pienempiä kuin käsilaskennassa ja yksi on isompi kuin käsilaskennassa. Algoritmi mitoitti pilarianturat sivumitoiltaan 100 millimetriä suuremmiksi kuin käsilaskennalla mitoitetut pilarianturat.

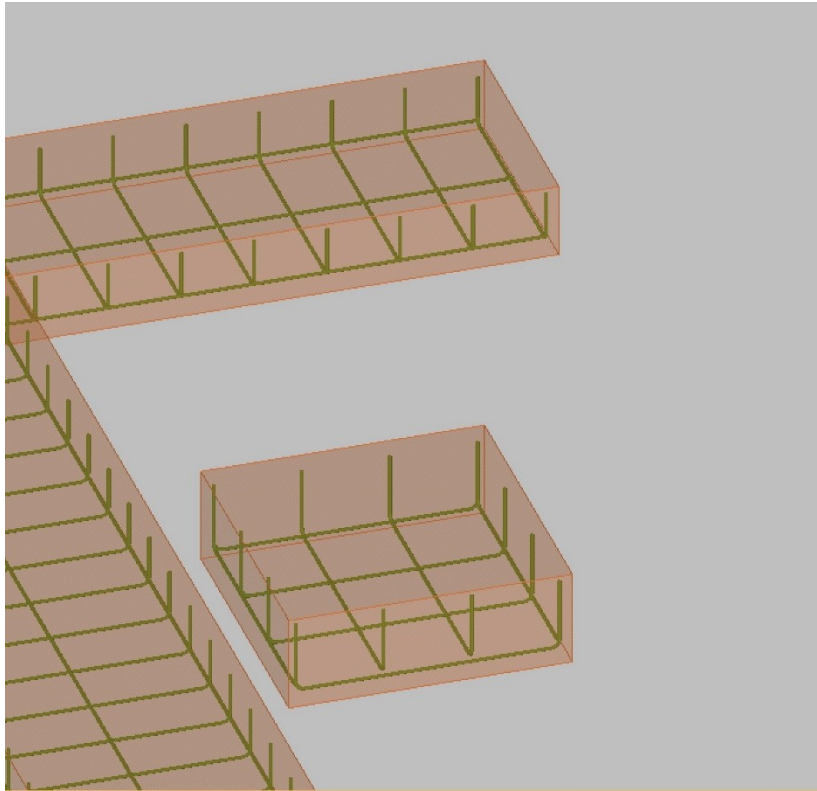
Seinäanturoiden raudoitukset 500 x 1600 kokoiselle anturalle laskentapohja mitoitti niin, että poikittaisraudoituksen jako on 50 millimetriä tiheämpi kuin käsilaskennassa ja pituussuuntainen raudoitus oli vastaava kuin käsilaskennassa. 500 x 1200 kokoiselle anturalle laskentapohjan mitoittamat raudoitukset olivat

poikittaisraudoituksen osalta vastaavat kuin käsilaskennassa ja pitkittäisraudoitukset yhden tangon vähemmän kuin käsilaskennassa. Mitoitettujen raudoitusten vertailu ei ole järkevää, mikäli anturakoot eivät ole vastaavat. Anturat mitoitetaan sallitulle pohjapaineelle ja sivumitan kasvaessa myös raudoitusta tarvitaan enemmän.

Kuvioissa 9 ja 10 esitetään algoritmin mitoittamat ja mallintamat anturat tietomallissa. Luotu algoritmi tuottaa anturan geometrian ja raudoituksen lähtötietoina annettujen seinälinjojen viivojen mukaan, joten mallinnettujen rakenneosien geometriat törmäävät toisiinsa anturoiden päätepisteissä.



Kuvio 9. Käsillä mitoitetut ja mallinnetut anturat, sekä algoritmin mitoittamat ja mallintamat anturat.



Kuvio 10. Algoritmin mitoittamat ja mallintamat anturat tietomallissa.

Algoritmin suunnitteluvaiheessa päätettiin, että rakenne- ja geotekniset laskelmat toteutetaan olemassa olevaa Excel-laskentapohjaa hyödyntäen. Grasshopperin ja Excel-ohjelman välinen yhteys osoittautui kuitenkin hitaaksi ja algoritmin käytön kannalta liian monimutkaiseksi ja työlääksi toteuttaa käytettävissä olevan ajan rajoissa, joten mitoituslaskelmat sisällytettiin Grasshopperin visuaaliseen ohjelmointikoodiin. Mitoituslaskelmat toteutettiin käyttämällä erilaisia yhtälö- ja laskentakomponentteja. Rakennettuna osaksi algoritmia mitoituslaskelmat toimivat luotettavasti ja nopeasti, sillä tietoa ei tarvitse siirtää ohjelmien rajapintojen yli useita kertoja riippuen anturoiden ja kuormitusyhdistelmien määrästä.

Tekla-livelink yhteydessä Grasshopperin ja Teklan välillä ei ilmennyt ongelmia. Geometrian ja raudoitusten luonti tietomalliin tapahtuu melko nopeasti riippuen mallinnettavien rakenteiden ja raudoitusten määrästä. Muutosten päivittäminen tietomallissa olevien rakenneosien dimensioihin ja raudoitukseen tapahtuu välittömästi parametreja muutettaessa.

7 Pohdinta

Tavoitteena tässä opinnäytetyössä oli selvittää parametrinen suunnittelun soveltuvuutta ja mahdollisuuksia perustusten suunnitteluprosessissa käytettäväksi. Lisätavoitteena oli luoda laskentapohja Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Tärkeimpiä tutkimuskysymyksiä olivat, miten hyvin luodun laskentapohjan tulokset vastasivat käsilaskennalla saatuja tuloksia ja mitä rajoitteita tai haasteita käytetyissä ohjelmistoissa sekä niiden yhteistoiminnassa mahdollisesti oli.

Käytetyn ohjelmakokonaisuuden ohjelmien yhteistoiminnasta selvisi kehityskohteita ja luodun algoritmin tulokset olivat pääosin vertailukelpoisia käsilaskennalla saatuihin tuloksiin. Tulosten perusteella voidaan todeta, että parametrinen suunnittelumenetelmä soveltuu hyvin käytettäväksi perustusten suunnittelussa. Saatuihin tuloksiin voidaan olla tyytyväisiä.

Vaikka kynnys visuaalisen ohjelmoinnin opetteluun aloittamiselle on pienempi kuin perinteisen tekstimuotoisen ohjelmoinnin opetteluun aloittamiselle, vaati käytettävien ohjelmistojen ja ohjelmoinnin opettelu huomattavasti aikaa. Opinnäytetyöhön käytetyn ajan rajallisuudesta johtuen laskentapohjaan tehtiin useita yksinkertaistuksia. Tästä huolimatta tulokset olivat pääosin vertailukelpoisia ja vertailulaskelmat antoivat käyttökelpoista tietoa, jota voidaan hyödyntää laskentapohjaa edelleen kehitettäessä.

Täyttä parametrinen suunnittelun potentiaalia luodulla laskentapohjalla ei voida kuitenkaan saavuttaa, sillä iterointia ei suoriteta. Laskentapohja suorittaa alkuarvauksen laskelmien pohjalta ja ilmoittaa mikäli esimerkiksi käyttöasteet tai kuorman epäkeskisyys ylittää määritetyt rajat. Laskentapohjaa voidaan kuitenkin hyödyntää nykyisessä muodossaan jo esimerkiksi luonnosvaiheessa perustusten rakenneosien alustavien dimensioiden ja raudoitusten määrittämisessä sekä suunnitteluratkaisujen vertailun apuvälineenä.

Luotua laskentapohjaa tulisi testata ja kehittää edelleen muissa kohteissa. Yhden esimerkkikohteen vertailulaskelmien perusteella ei voida vielä arvioida tulosten luotettavuutta varmasti. Tutkimustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että parametrinen suunnittelumenetelmä soveltuu hyvin käytettäväksi perustusten suunnittelussa.

Luotua laskentapohjaa voidaan kehittää eri osa-alueilla edelleen huomattavasti. Parametrisen mallinnuksen osalta algoritmia tulisi kehittää niin, että anturoiden geometriaa leikataan automaattisesti, jotta anturat eivät törmää toisiinsa tietomallissa. Excel-laskentapohjien käyttämisellä laskennassa saataisiin hyötyä ohjelmien välisestä yhteistoiminnasta ja laskentaa ei tarvitsisi rakentaa algoritmin sisälle, sillä se voitaisiin tehdä jo olemassa olevilla laskentapohjilla. Tällöin saataisiin käyttöön myös työstä pois rajatut lähtötiedoista riippuvat laskentamenetelmät ja kaikki rajatilamitoitukset. Lisäksi työssä käytetyt yksinkertaistukset ja rajaukset poistuisivat laskennasta. Jatkossa algoritmissa käytettävään ohjelmakokonaisuuteen voitaisiin lisätä myös FEM-laskentaohjelmat, joista voitaisiin saada osa lähtötiedoista kuten perustuskuormat algoritmille. Mikäli laskentapohjaa kehitetään niin, että laskentapohjan tuottama tietomalli perustusten rakenneosista on riittävän tarkalla tasolla, voitaisiin algoritmiin sisällyttää myös suunnitelmadokumenttien tuottaminen.

Parametrinen suunnittelun käyttö rakenneteknisessä suunnittelussa sisältää paljon potentiaalia. Sen avulla voidaan vähentää suunnittelijan manuaalisesti tekemää tiedonsiirtoa ja mallinnusta, ja näin ollen vähentää suunnittelun riskejä. Keskeisimpiä haasteita tällä hetkellä ovat ohjelmoinnin osaamisen ja tietotaidon puute. Käytettävät ohjelmistot ja niiden lisäosat kehittyvät kuitenkin jatkuvasti. Suunnittelijoiden tietotaidon ja ohjelmointiosaaminen lisääntyessä parametriseista suunnittelumenetelmästä voi jatkossa tulla tärkeä osa rakennesuunnittelua.

Lähteet

Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan osa 6: Perustukset. 2011

Betoniteollisuus. Viitattu 22.4.2020. https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_6_Perustukset.pdf

Eurocode 2 Commentary. 2017. European Concrete Platform ASBL. Viitattu 14.5.2020 https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/Eurocode2_Commentary.pdf

Grasshopper-Tekla Live Link. 2020. Ohje Trimble Solutions Corporationin verkkosivustolla. Julkaistu 3.2.2020. Viitattu 26.4.2020 https://teklastructures.support.tekla.com/not-version-specific/en/ext_grasshopperteklalink

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2010. Tutki ja kirjoita. 15.–16. p. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

Lalla, A. 2017. Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Viitattu 10.2.2020. <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201712212481>

Leskelä, M. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, BY 210. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy

Rakennetekniikka. N.d. Sweco Finland Oy:n verkkosivusto. Viitattu 19.4.2020. <https://www.sweco.fi/palvelumme/rakennetekniikka/>

RIL 207-2017. 2017. Geotekninen suunnittelu, eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC:2015. Eurokoodi 2: betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Vahvistettu 19.1.2015. Viitattu 19.3.2020. <https://janet.finna.fi>, SFS Online

SFS-EN 1997-1 + A1 + AC:2014. Eurokoodi 7: Geotekninen Suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Vahvistettu 27.1.2014. Viitattu 19.3.2020 <https://janet.finna.fi>, SFS Online

Sweco. N.d. Sweco Finland Oy:n verkkosivusto. Viitattu 20.4.2020. <https://www.sweco.fi/tietoa-swecosta/>

Tanska, T. & Österlund, T. 2014. Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta. Viitattu 25.2.2020. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526204567>

Vähänen, P. 2019. Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkorakenteiden luonnossuunnittelussa. Diplomityö. Oulun yliopisto, tekninen tiedekunta, rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Viitattu 25.2.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201906042312>

Liitteet

Liite 1. Rakenneosien dimensiot

Rakenneosa	Koko laskentapohjasta (H*B) [mm*mm] / (L*B*H) [mm*mm*mm]	Koko laskentapohjasta (määritetyt koot) (H*B) [mm*mm] / (L*B*H) [mm*mm*mm]	Koko käsilaskennasta (H*B) [mm*mm] / (L*B*H) [mm*mm*mm]
Seinäantura 0	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 1	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 2	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 3	400*1100	500*1200	500*1200
Seinäantura 4	400*1100	500*1200	500*1200
Seinäantura 5	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 6	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 7	400*1100	500*1200	500*1200
Seinäantura 8	600*1800	600*1800	600*2100
Seinäantura 9	400*1100	500*1200	500*1200
Seinäantura 10	200*600	500*1200	500*1200
Seinäantura 11	350*1000	500*1200	500*1200
Seinäantura 12	350*1000	500*1200	500*1200
Seinäantura 13	250*700	500*1200	500*1200
Seinäantura 14	400*1100	500*1200	500*1200
Seinäantura 15	450*1300	500*1600	500*1600
Seinäantura 16	300*900	500*1200	-
Seinäantura 17	350*1000	500*1200	500*1200
Seinäantura 18	400*1200	500*1200	500*1600
Seinäantura 19	600*1700	600*1800	600*2100
Seinäantura 20	400*1200	500*1200	500*1600
Seinäantura 21	300*900	500*1200	500*1600
Seinäantura 22	400*1100	500*1200	500*1600
Seinäantura 23	450*1300	500*1600	500*1200
Pilariantura 0	1300*1300*450	-	1200*1200*500
Pilariantura 5	1300*1300*450	-	1200*1200*500

Liite 2. Rakenneosien poikittaisraudoitus ja pitkittäisraudoitus.

Rakenneosa	Laskentapohjasta		Laskentapohjasta (määritetylle koolle)		Käsilaskennasta	
	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus Kpl	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus Kpl	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus Kpl
Seinäantura 0	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 1	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 2	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 3	350	3	300	4	300	5
Seinäantura 4	350	3	300	4	300	5
Seinäantura 5	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 6	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 7	350	3	300	4	300	5
Seinäantura 8	200	7	200	8	150	7
Seinäantura 9	350	3	300	4	300	5
Seinäantura 10	550	1	300	4	300	5
Seinäantura 11	350	2	300	4	300	5
Seinäantura 12	350	2	300	4	300	5
Seinäantura 13	400	1	300	4	300	5
Seinäantura 14	350	3	300	4	300	5
Seinäantura 15	300	4	250	6	300	6
Seinäantura 16	450	2	300	4	-	-
Seinäantura 17	350	2	300	4	300	5
Seinäantura 18	300	3	300	4	300	6
Seinäantura 19	200	6	200	8	150	7
Seinäantura 20	300	3	300	4	300	6
Seinäantura 21	450	2	300	4	300	6
Seinäantura 22	350	3	300	4	300	6
Seinäantura 23	300	4	250	6	300	5
	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus jako [mm]	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus jako [mm]	poikittais- raudoitus jako [mm]	pitkittäis- raudoitus jako [mm]
Pilariantura 0	250	250	-	-	250	250
Pilariantura 5	250	250	-	-	250	250